

# Adjuvants et nouveaux bétons

---



# Sommaire

- 1. Généralités**
- 2. Les entraîneurs d'air**
- 3. Les accélérateurs**
- 4. Les retardateurs**
- 5. Les plastifiants / super plastifiants et BAP**
- 6. Les agents viscosants et les réducteurs de retrait**
- 7. BHR / BFUP**
- 8. L'essentiel**

## 1. Généralités

### Adjuvants:

- Liquides ou poudre
- Ajoutés au mélange pendant le malaxage
- Dans une proportion de 5% maximum de la masse du liant (en général le ciment)
- Par leur action physique et/ou chimique, ils modifient les propriétés du béton frais et/ou du béton durci.



## **1. Généralités**

But des adjuvants :

- Améliorer les performances (résistances mécaniques et durabilité)
- Compensation des déficiences (par exemple fissuration de retrait)

**Remarque :** L'utilisation d'adjuvants augmente le coût du béton

## 2. Les entraîneurs d'air

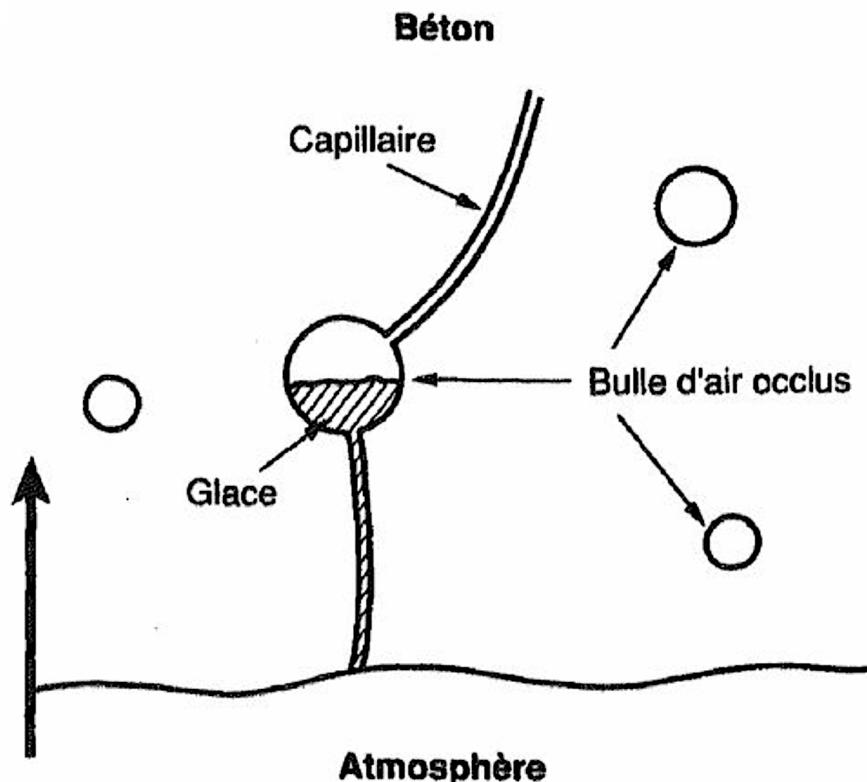
Problématique :

Résistance au gel

Solution :

Ajout d'entraîneur d'air :

- Créer le volume nécessaire à l'expansion de la glace sans endommager la microstructure du béton



## 2. Les entraîneurs d'air

### Composition :

- Composés **tensio-actif** comme des sels de sodium ou des acides gras organiques, principalement anioniques

### Mécanisme des tensioactifs :

- Polymères à **longues chaines** avec un groupe polaire à une extrémité
- Les molécules se concentrent à **l'interface air-liquide**

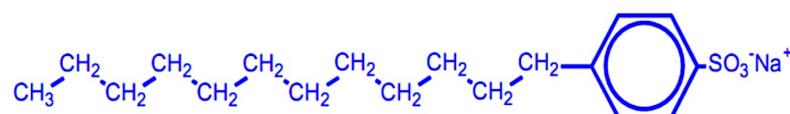
Chaîne hydrophobe  
(insoluble dans l'eau)



Tête hydrophile  
(soluble dans l'eau)

Anionique –  $\text{COO}^-$   
–  $\text{SO}_4^{2-}$   
–  $\text{SO}_3^-$

Ex: Dodecylbenzenesulfonate de Na (DDBS)

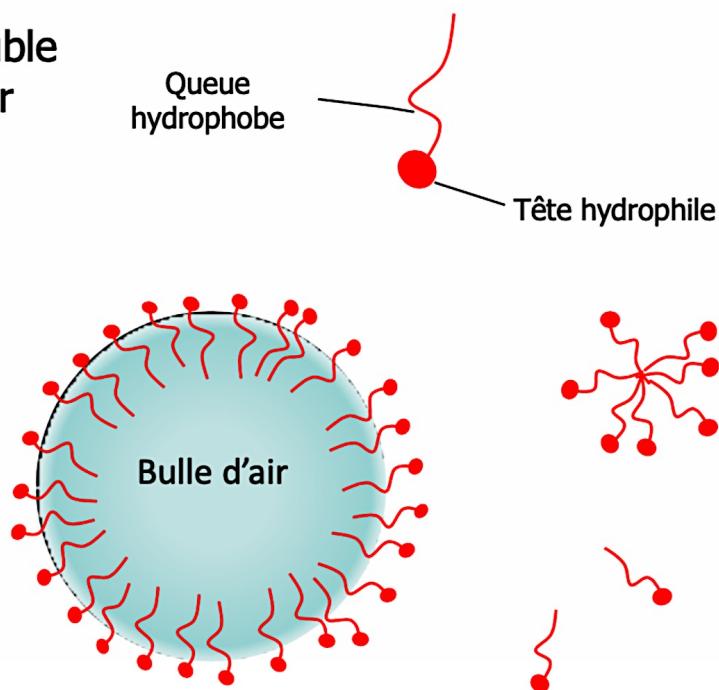


## 2. Les entraîneurs d'air

Mécanisme des tensioactifs :

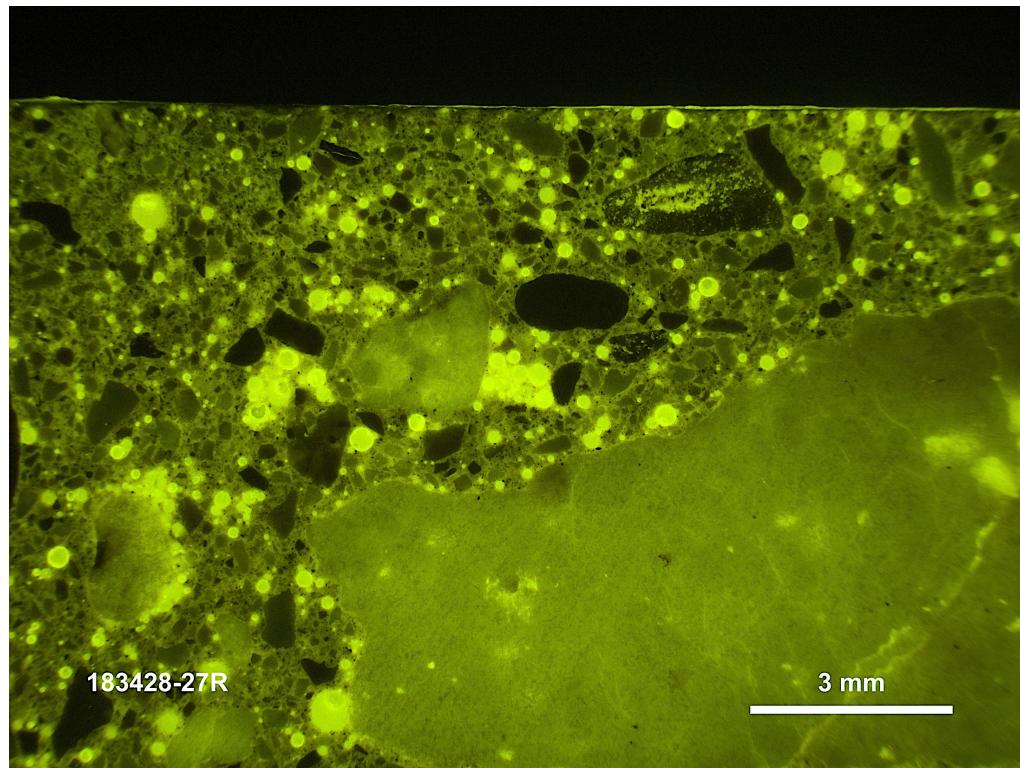
- Les groupes **polaires** s'alignent côté **liquide**
- Les groupes **non-polaires** s'alignent côté **air**

Formation d'un film insoluble  
(et hydrophobe) autour  
des vides d'air



## 2. Les entraîneurs d'air

Béton avec entraîneur d'air (pores de diamètres 10 à 500 microns) :



- L'ajout d'entraîneur d'air améliore également l'**ouvrabilité** du béton frais
- Pour ne pas engendrer une perte trop importante de résistance à la compression, le volume total de pores **ne doit pas dépasser env. 4%<sub>vol.</sub>**

### **3. Les accélérateurs**

#### **Problématique :**

Besoin d'accélérer le processus d'hydratation pour avoir une prise plus rapide et une résistance au jeune âge améliorée

#### **Nécessité de :**

- Avancer les opérations de finition
- Réduire le temps de cure
- Augmenter la vitesse de durcissement pour le décoffrage et la mise en service
- Réduire le risque de gel du béton à l'état frais en hiver

#### **Solutions :**

- Augmenter la cinétique d'hydratation  
→ Ajout d'un accélérateur

### **3. Les accélérateurs**

Les principales classes d'accélérateurs :

**A. Effet instantané** (accélérateur de prise)

**Application** : Shotcrete (béton projeté)

**Composition** : les sels d'aluminium (alumino-sulfates)

**B. Effet dans les premières heures** (accélérateur de durcissement)

**Application** : la préfabrication

**Composition** : Les chlorures de calcium / sodium, les solutions de CSH ...

→ Attention à la corrosion des armatures!

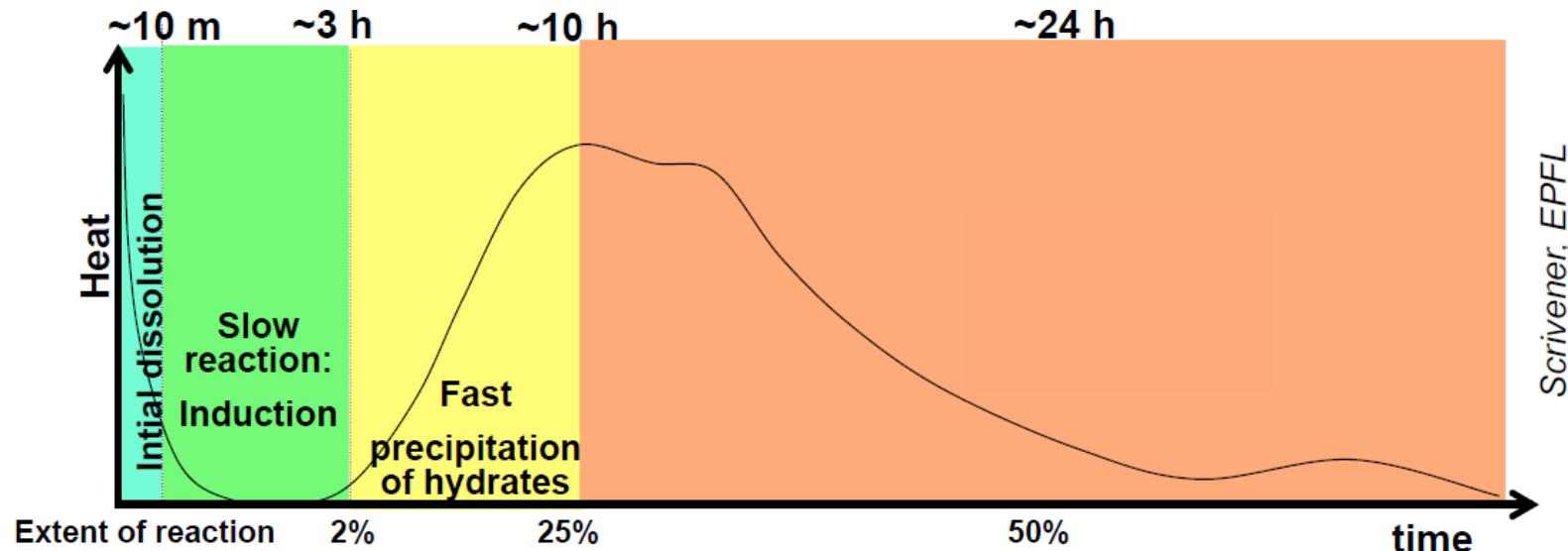
**C. Effet dans les premiers jours** (accélérateur de durcissement)

**Application** : Mélanges prêt à l'emploi ( démolage rapide)

**Composition** : Tri-isopropanol amine TIPA

### 3. Les accélérateurs

Processus d'hydratation, rappel



**Phases anhydres :**

Silicates: Alite ( $\text{C}_3\text{S}$ ), Belite ( $\text{C}_2\text{S}$ )

Aluminates:  $\text{C}_3\text{A}$ ,  $\text{C}_4\text{AF}$

**Hydratation :**



### **3. Les accélérateurs**

CaCl<sub>2</sub>, très efficace, mais attn corrosion des armatures

#### **Mécanisme :**

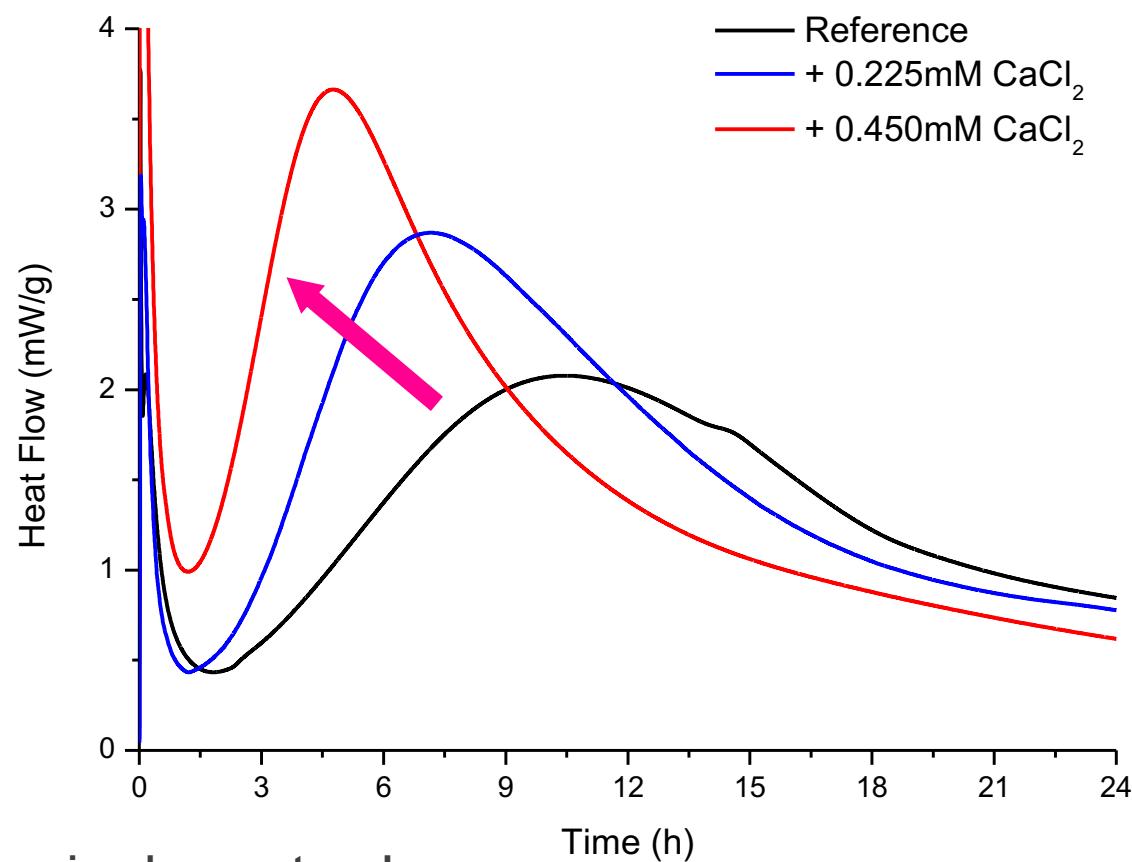
Pas encore clair pour le moment

#### **Hypothèses :**

- Augmentation de la solubilité des ions calcium en solution
- Effet des chlorures sur la cinétique de dissolution
- Effet des chlorures sur la croissance des hydrates

### 3. Les accélérateurs

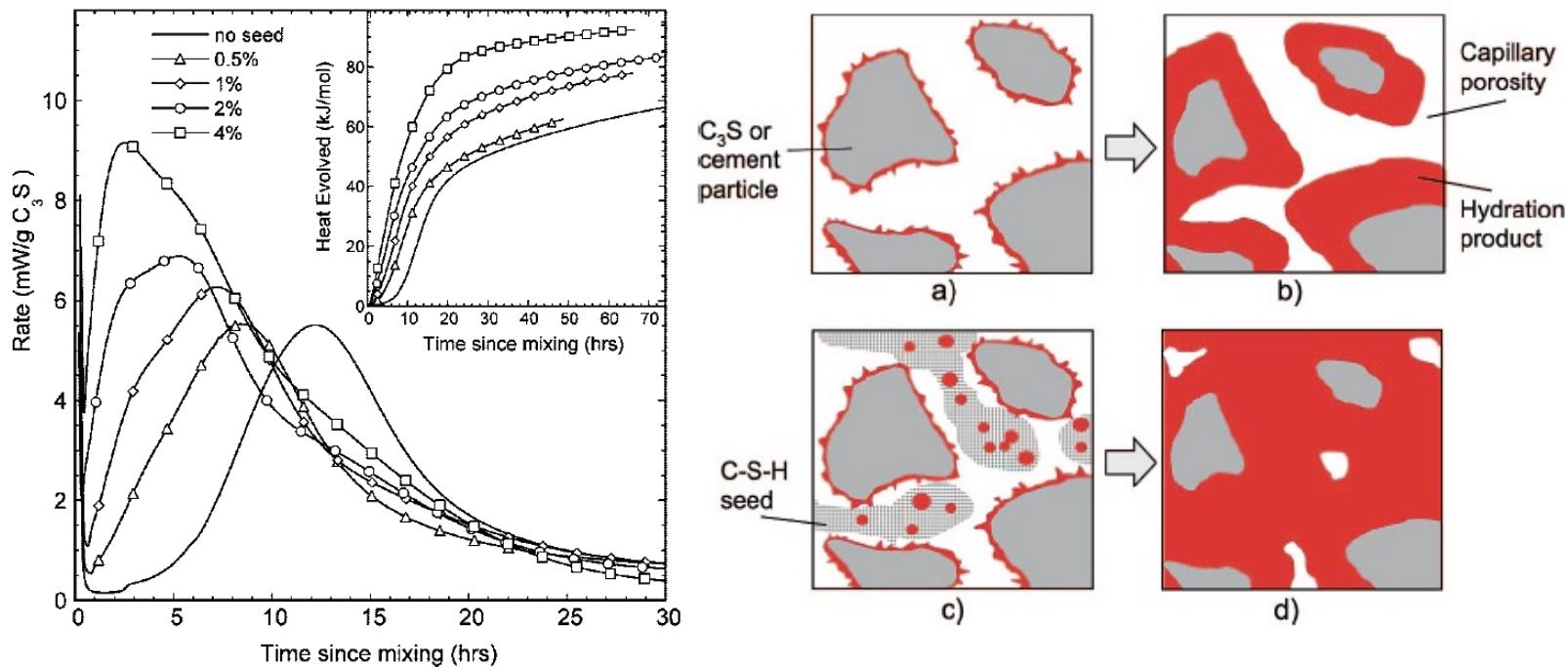
Exemple : Effet du  $\text{CaCl}_2$



→ Attention à la corrosion des armatures!

### 3. Les accélérateurs

Exemple : Addition de nuclei de C-S-H



- Réduction de l'énergie de nucléation
- La croissance des hydrates peut commencer presque instantanément

### 3. Les accélérateurs

Exemple de mauvaise utilisation d'un accélérateur :

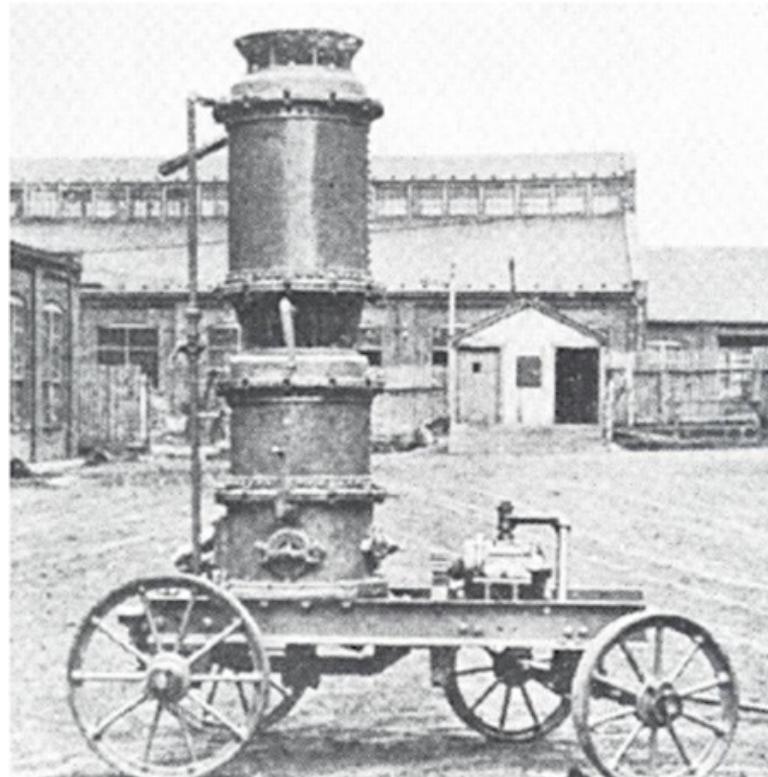


### 3. Les accélérateurs

Invention du béton projeté (shotcrete) : 1907



Carl E. Akeley (1864-1926)



'cement-gun' 1910

### 3. Les accélérateurs

#### Béton projeté - exemple d'application

Retenue d'eau des Marécottes (1926)

Alexandre Sarrasin (1895-1976)

voûte en béton projeté



### 3. Les accélérateurs

#### Béton projeté - exemple d'application

Stabilisation de falaises



### 3. Les accélérateurs

#### Béton projeté - exemple d'application

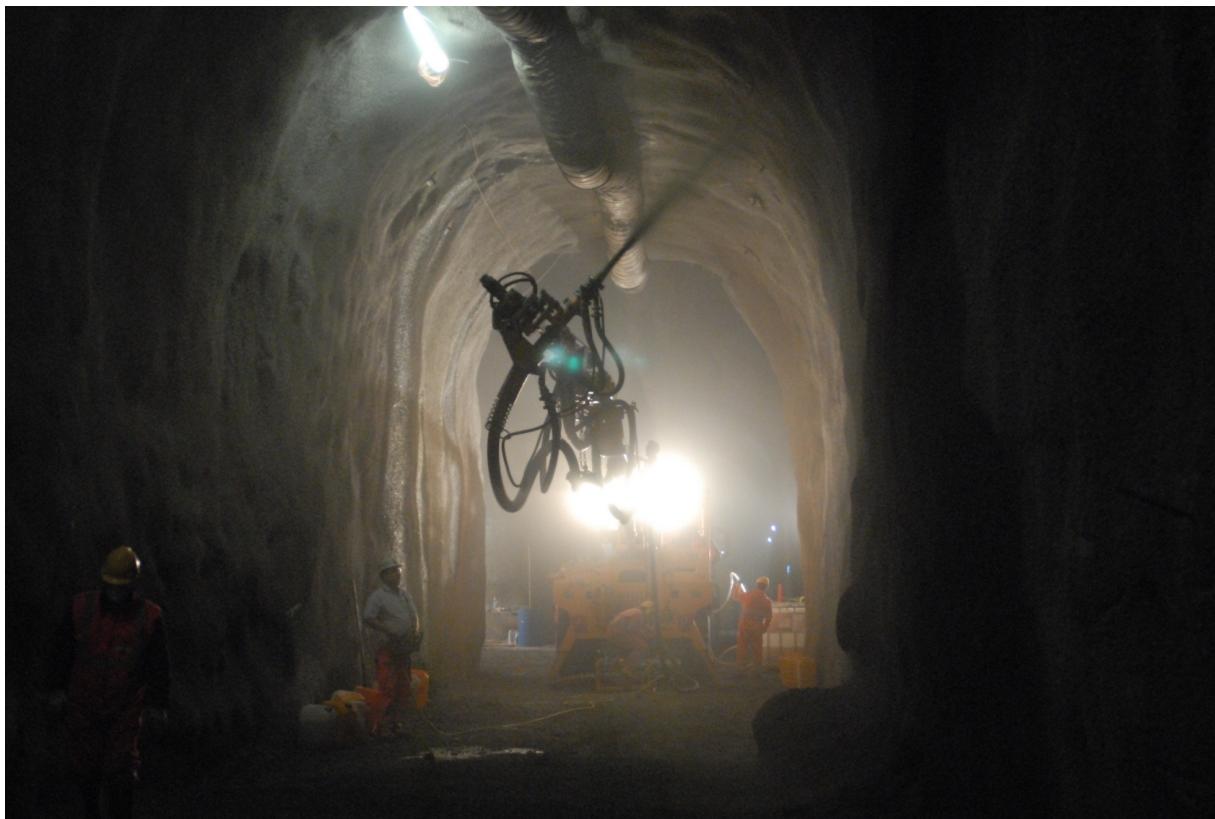
Construction du M2, Lausanne : tunnel St-Laurent



### **3. Les accélérateurs**

**Béton projeté - exemple d'application**

Tunnels



### **3. Les accélérateurs**

#### **Béton projeté - exemple d'application**

Tunnels



### 3. Les accélérateurs

Application :



Shotcrete

SIKA TUNNELING AND MINING

© Copyright Sika Services AG 2014 - All rights reserved

BUILDING TRUST  
**Sika**®

## 4. Les retardateurs

**Problématique :**

besoin d'empêcher la prise

**Nécessité de :**

- Prolonger la période avant la prise
- Compenser l'accélération de la prise sous les effets de la chaleur



**Solution :**

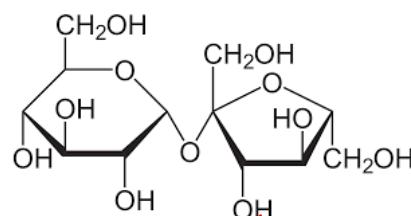
retarder la cinétique d'hydratation

→ ajout d'un retardateur

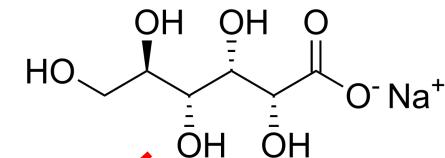
## 4. Les retardateurs

Composition :

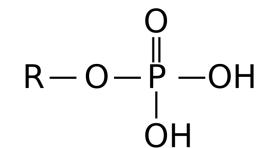
sucrose



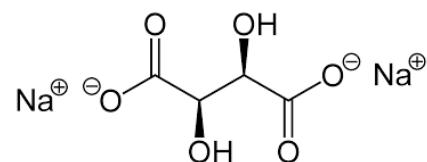
gluconate de sodium



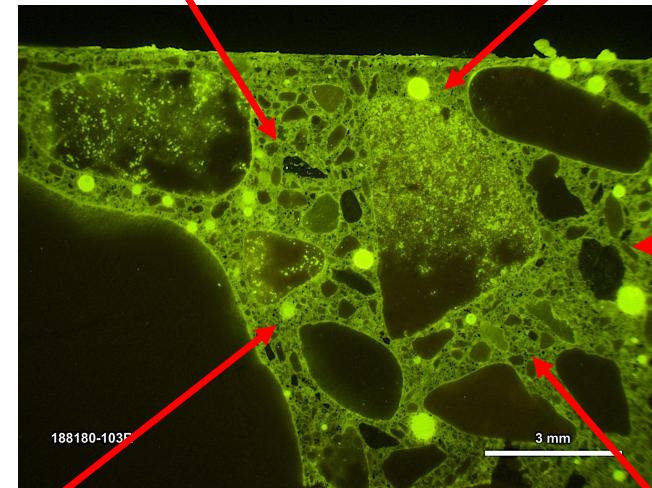
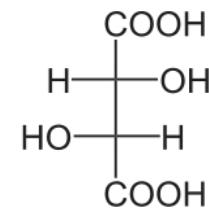
phosphate



tartrate de sodium



acide tartrique



## 4. Les retardateurs

Mécanisme :

Pas encore clair pour le moment

Hypothèses :

- **Adsorption** de l'adjuvant sur les phases en dissolution ou précipitées → réduit la cinétique d'hydratation
- L'adjuvant réagit avec des composants du mélange et se **précipitent** sur les anhydres → formation d'une couche protectrice
- **Complexation** de l'adjuvant avec les ions  $\text{Ca}^{2+}$  → réduction des ions  $\text{Ca}^{2+}$  disponibles
- L'adjuvant bloque les sites de nucléation des hydrates par **nucléation** → inhibe la formation de nouveaux hydrates

## 5. Les plastifiants / super plastifiants

### Problématique :

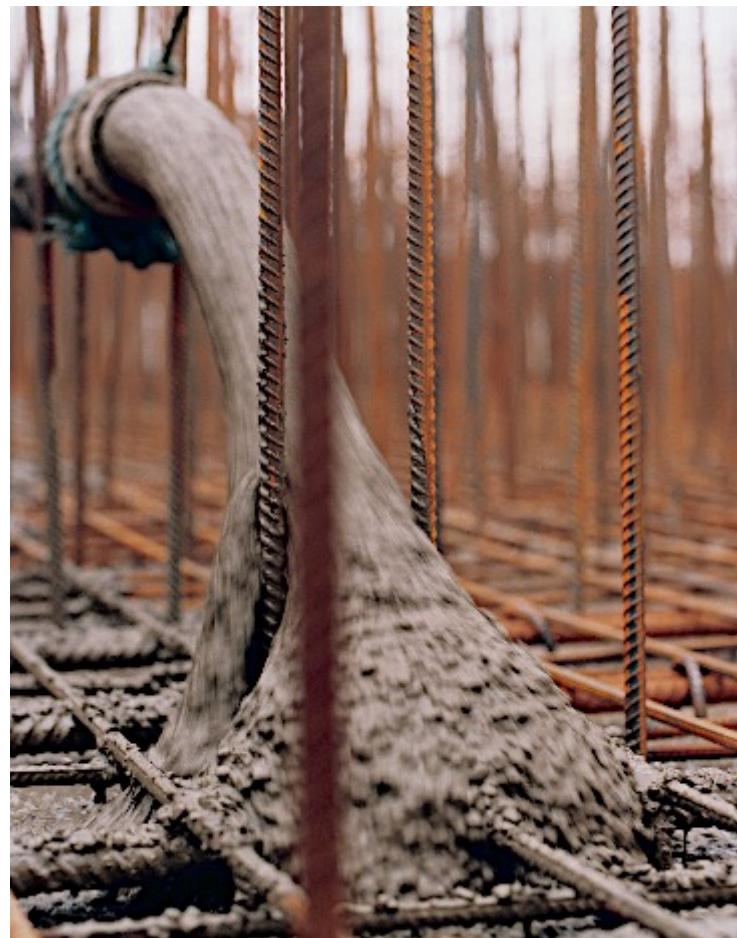
Besoin d'ouvrabilité pour la mise en place sans perdre de propriétés mécaniques et/ou de durabilité

Respecter les exigences normatives  
SN EN 206

→ Rappel : l'ajout d'eau augmente la porosité capillaire!

### Solution :

Addition d'un plastifiant ou superplastifiant (dosage 0.1-1%)



## 5. Les plastifiants / super plastifiants

Fluidification

OU

Réduction du rapport  
e/c  
(durabilité -  
résistance)

OU

Réduction de la teneur  
en ciment



## 5. Les plastifiants / super plastifiants

Développements récents de la technologie des bétons:  
→ adjuvants organiques et additions minérales



HPC  
High Performance  
Concretes

BFUP  
Béton fibré à ultra  
haute performance



Béton projeté



SCC / BAP  
Béton auto plaçant

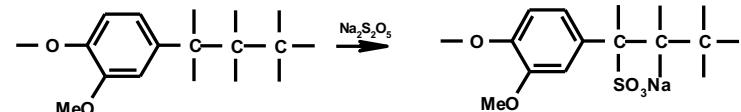


## 5. Les plastifiants / super plastifiants

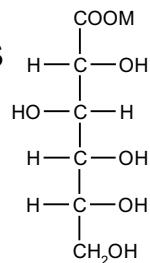
Historique des plastifiants / super plastifiants et composition

1930  
1940  
1950  
1960  
1970  
1980  
1990  
2000  
2010

Ligninsulphonates

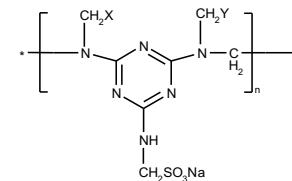
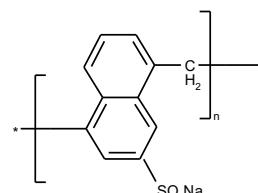


Carbohydrates

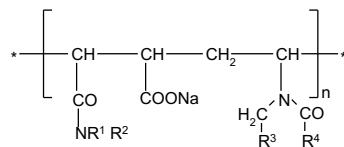


Stabilisation électro-statique (ancien)

Naphthalinsulphonate

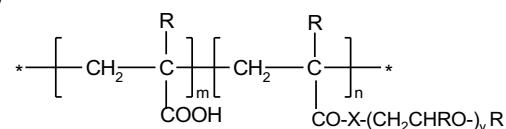


Melaminsulphonate



Vinyl Copolymer

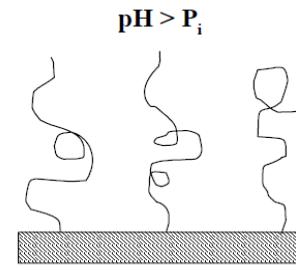
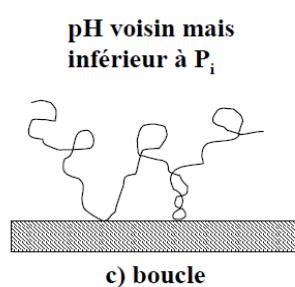
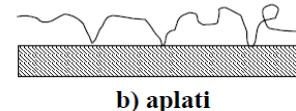
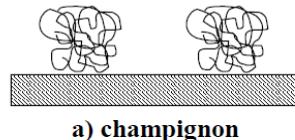
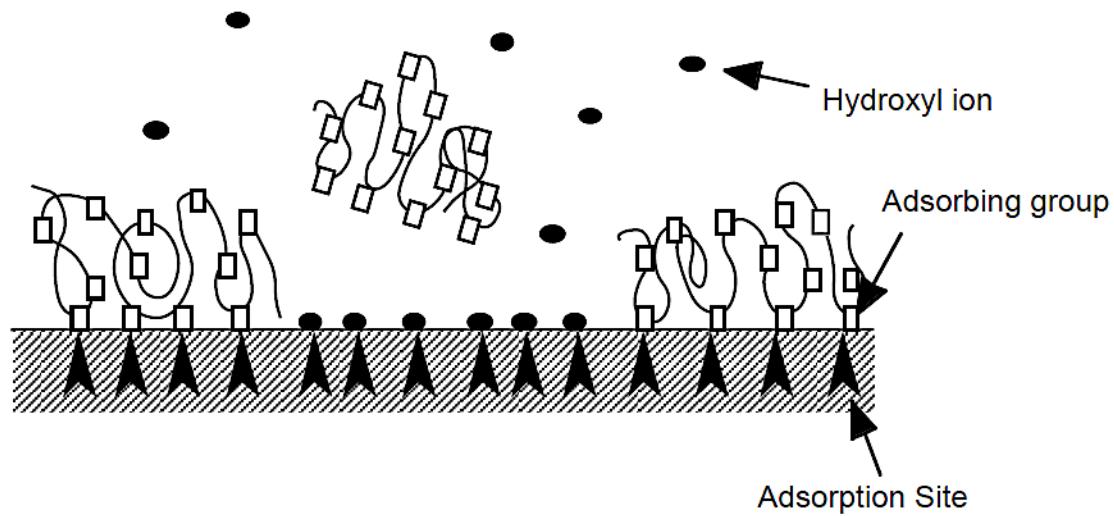
Poly-Carboxylate-Ether  
(PCE)



Stabilisation stérique

## 5. Les plastifiants / super plastifiants

Mécanisme :

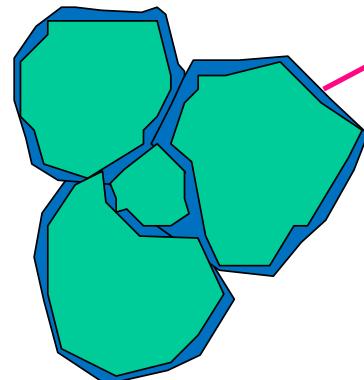


[Flatt, 1999]  
[Perche, 2004]

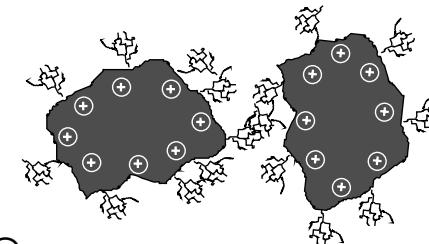
## 5. Les plastifiants / super plastifiants

Mécanisme :

Forces de Van der Waals  
(attractive)

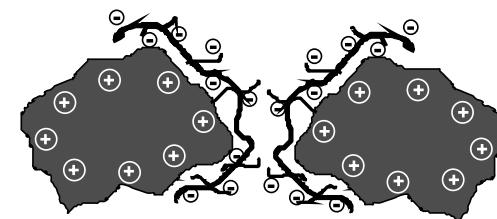


Répulsion stérique



Ou:

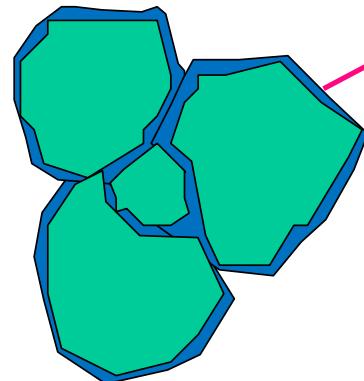
( Répulsion électrostatique )



## 5. Les plastifiants / super plastifiants

Mécanisme :

Forces de Van der Waals  
(attractive)



Répulsion stérique



( Répulsion électrostatique )



La surface spécifique du mélange influence l'effet de l'adjuvant!

→ Importance des « fines » dans le sable du mélange

## 5. Les plastifiants / super plastifiants

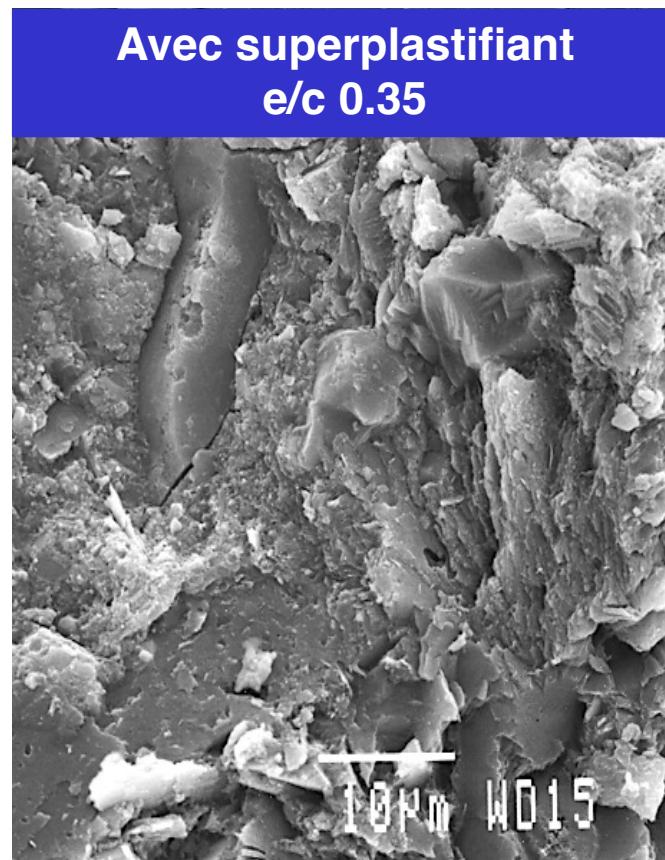
Mécanisme :



## 5. Les plastifiants / super plastifiants

Mécanisme :

Deux bétons à ouvrabilité identique:

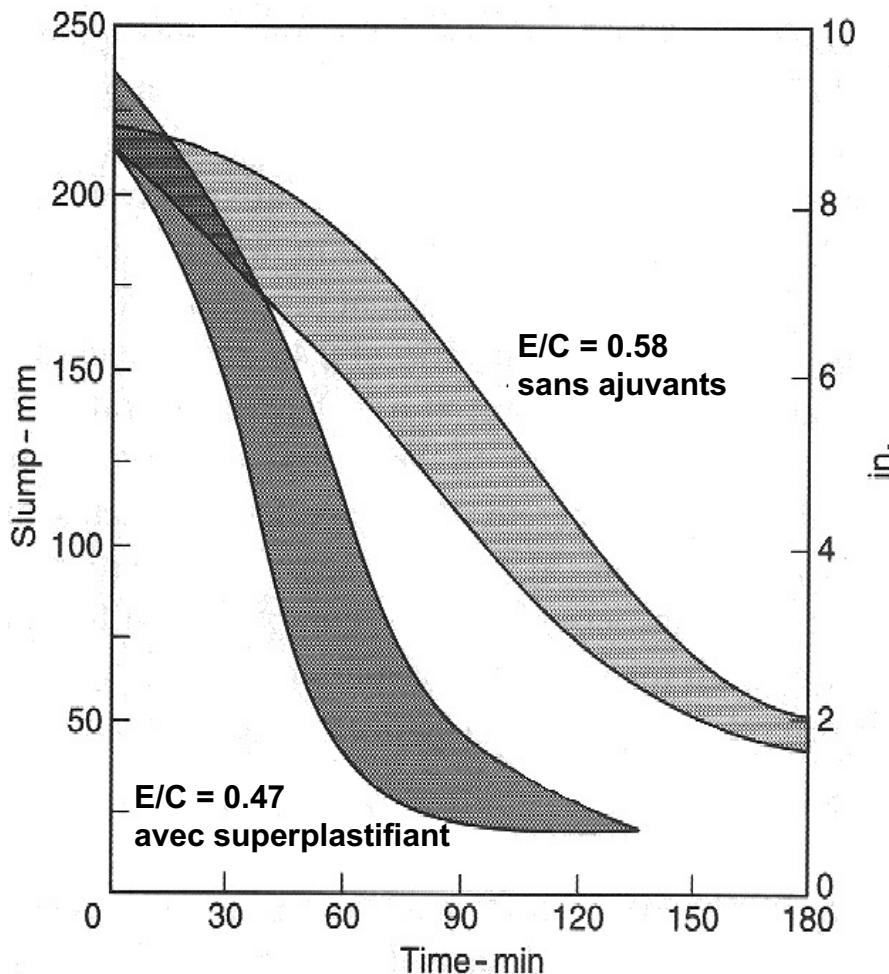


[Maeder et al., 1999]

## 5. Les plastifiants / super plastifiants

Mécanisme :

Perte de slump :



L'effet des SPs est limité dans le temps : Ils sont absorbés dans les produits d'hydratation des aluminates.

La vitesse de perte d'efficacité dépend de:

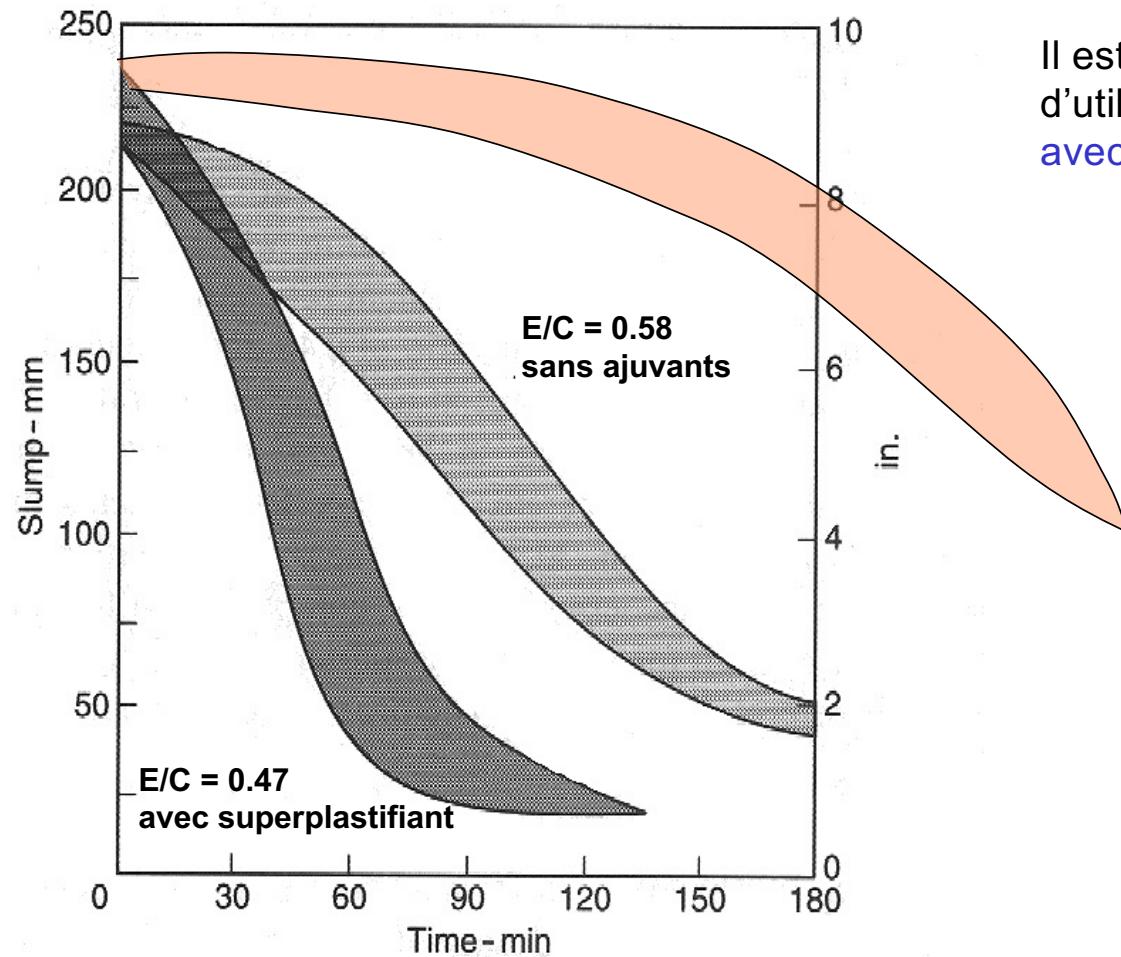
- $C_3A$ ,  $SO_3$ , alcalins
- température
- finesse

La perte de l'effet peut être minimisée en retardant l'addition d'ajoutant (sur chantier)

## 5. Les plastifiants / super plastifiants

Mécanisme :

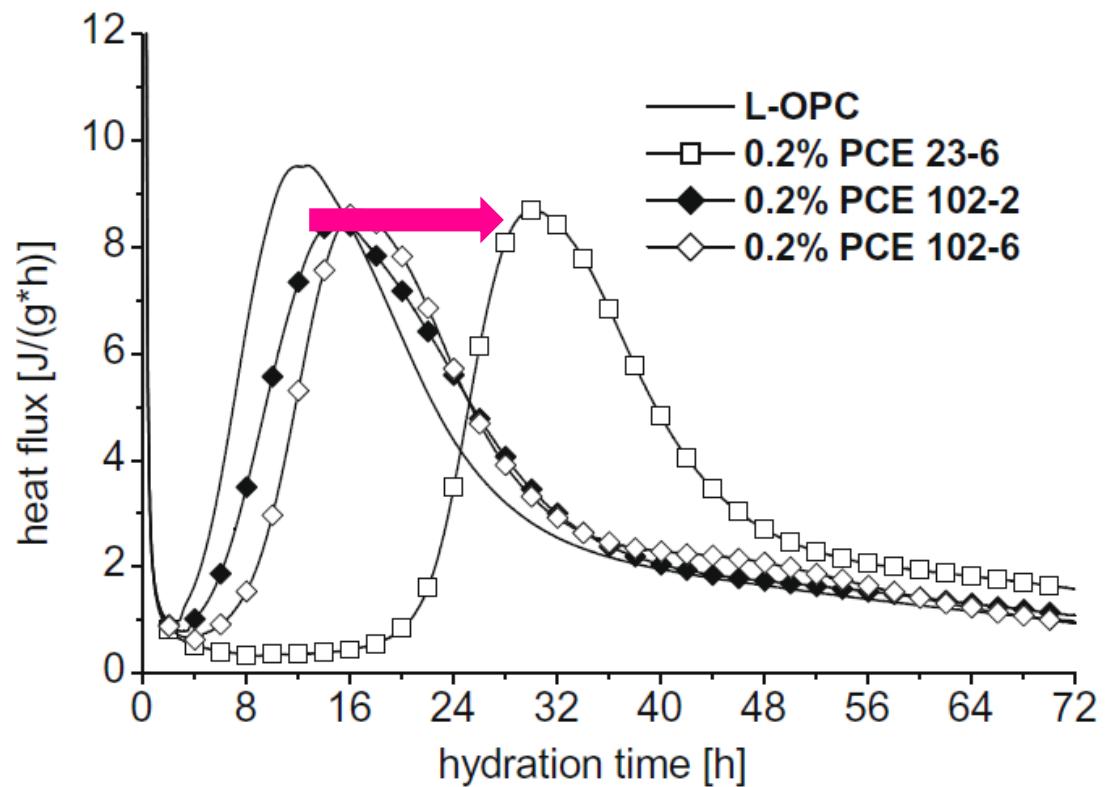
Perte de slump :



Il est également possible d'utiliser [le superplastifiant](#) avec un retardateur

## 5. Les plastifiants / super plastifiants

Attention cependant à l'effet des PCE:  
Certains ont un effet retardateur



## 6. Les réducteurs de retrait

Les différents types de retrait :

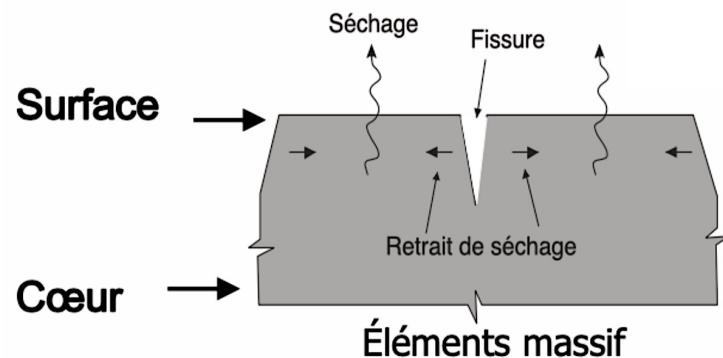
- **retrait plastique**
  - évaporation de l'eau de gâchage pendant la prise
- **retrait endogène**
  - changement de volume du mélange sous l'effet de l'hydratation
- **retrait de séchage**
  - évaporation de l'eau de la porosité capillaire (après la prise)
- **retrait thermique**
  - variation de température due à l'hydratation

## 6. Les réducteurs de retrait

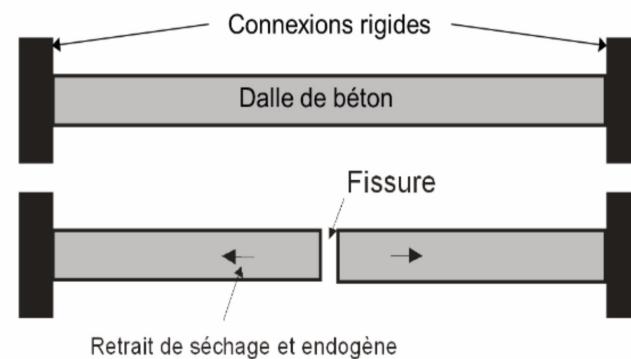
Problématique :

risques de l'apparition de fissures lors du retrait

fissuration de retrait :



fissuration de retrait entravé :



Solutions :

Ajout d'agents anti-retrait de type surfactant

## 6. Les réducteurs de retrait



Photo 3 – Contrecoeur de fenêtre fissuré (sud)



Photo 4 – Fissure pénétrant profondément dans le béton (mur nord)

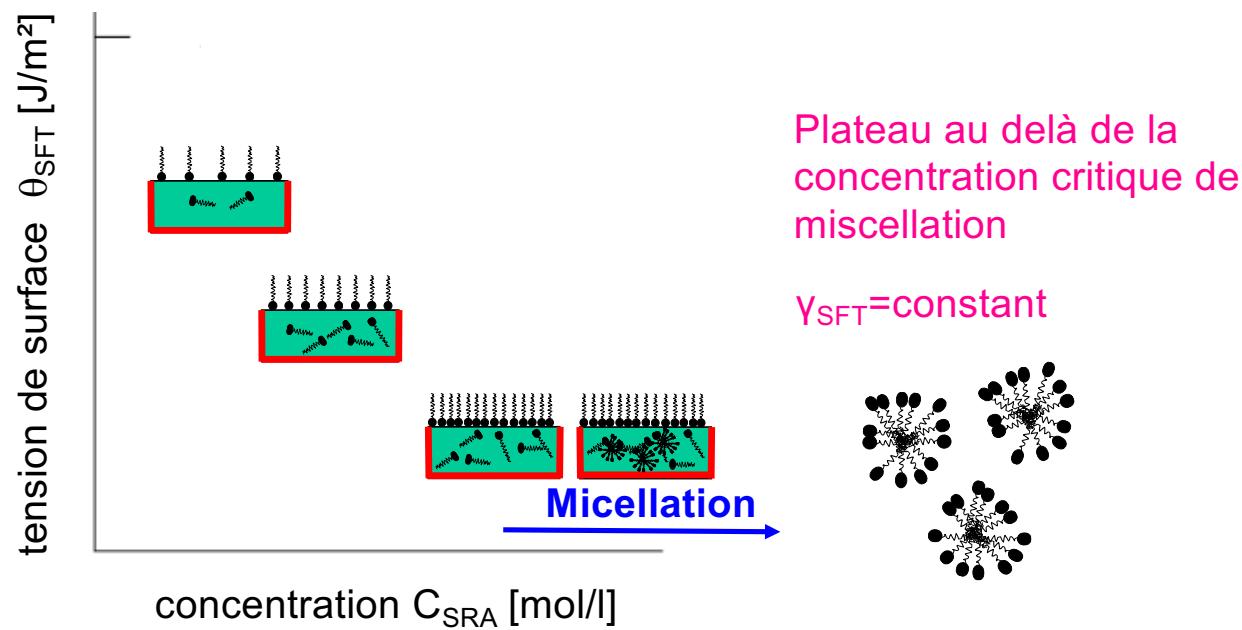
## 6. Les réducteurs de retrait

Mécanisme :

Activité de surface des surfactants non-ioniques

Composition : p. ex. éthers de glycole

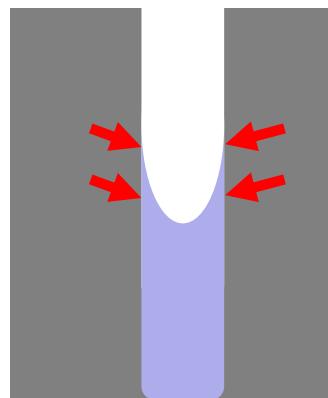
- ⇒ Un excès de surfactants en surfaces [mol/m<sup>2</sup>] réduit la tension de surface du béton



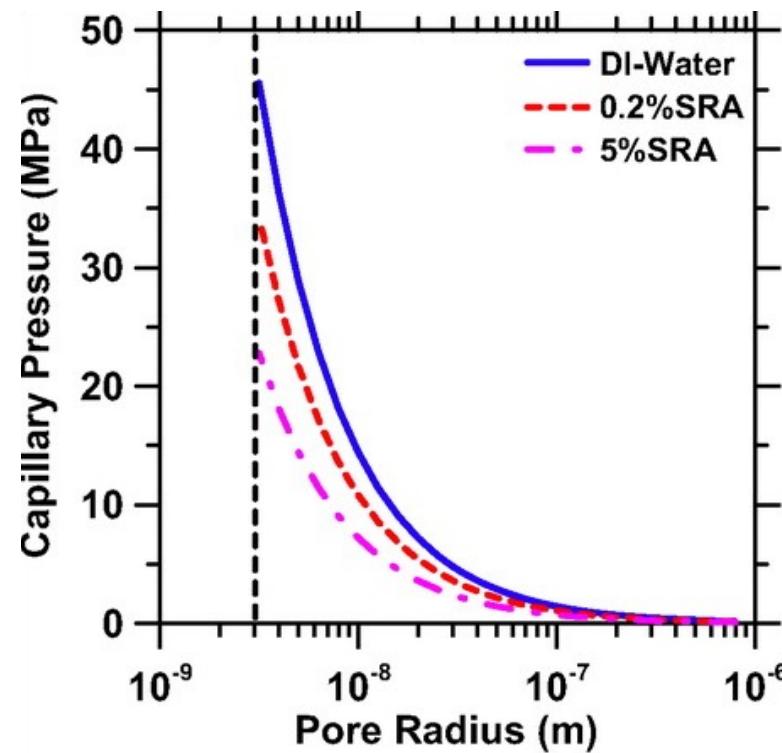
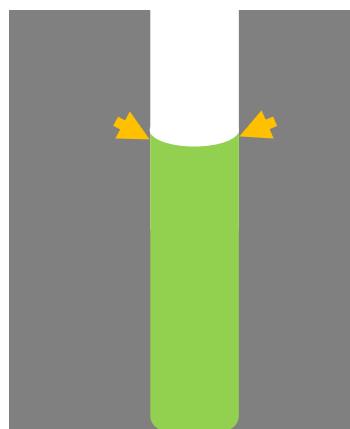
## 6. Les réducteurs de retrait

Mécanisme :

surface de béton sans SRA:



surface de béton avec SRA:



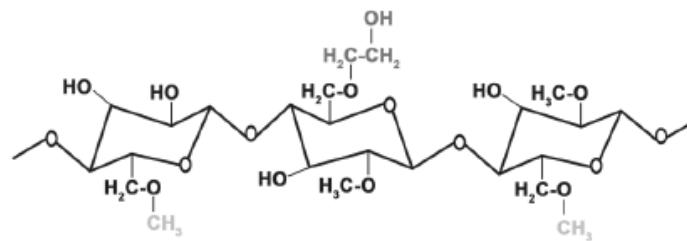
## 6. Les agents viscosants

Problématique :

- Ségrégation du béton

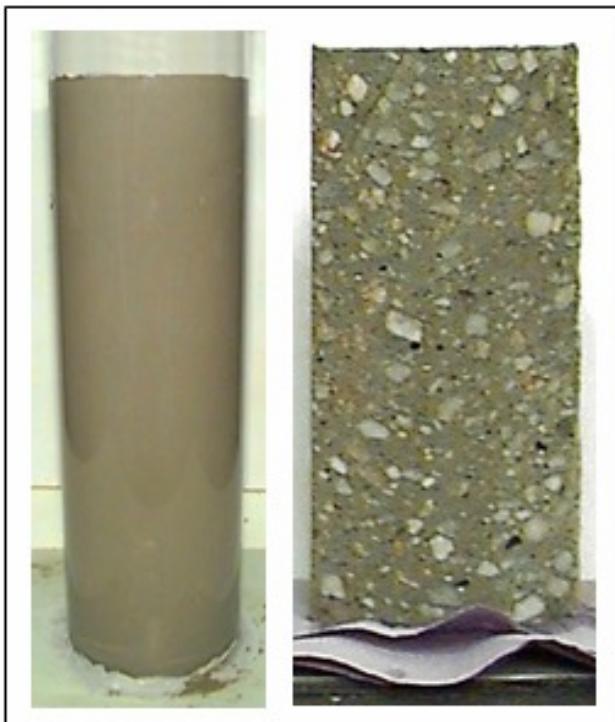
Solutions :

- Ajout d'agents de viscosité comme les éthers de cellulose, glucose, ou les gommes naturelles

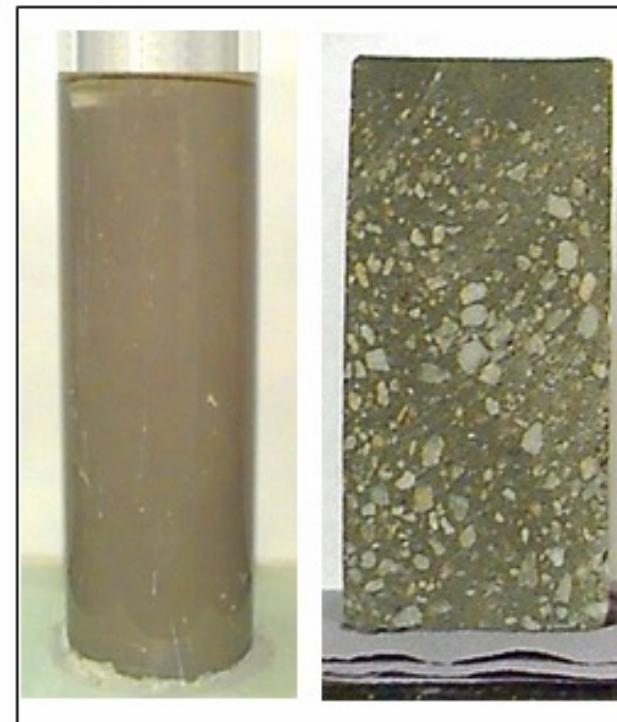


## 6. Les agents viscosants

béton homogène :

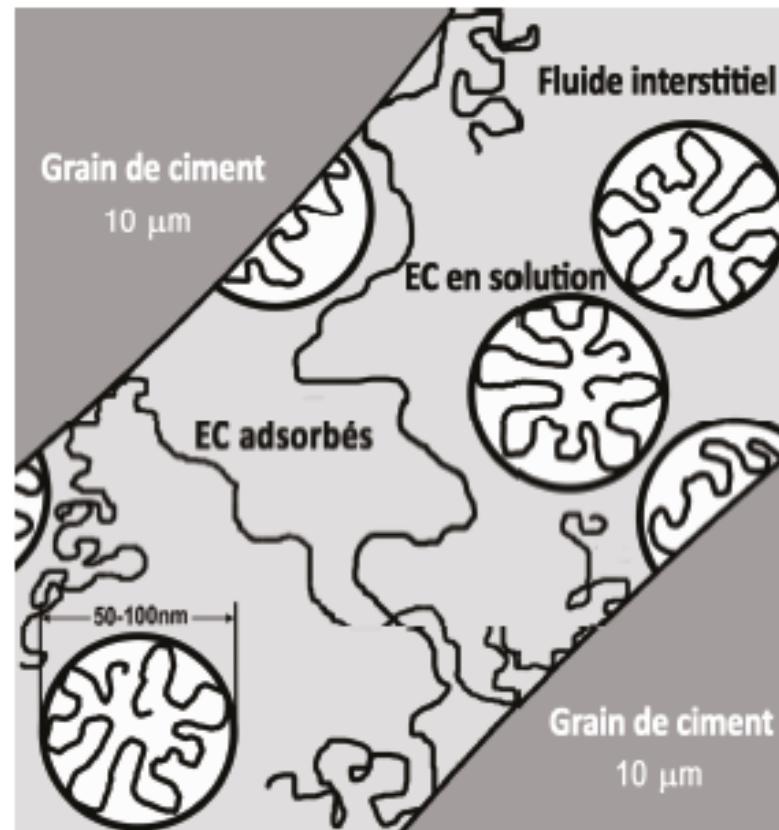


béton ségrégué :



## 6. Les agents viscosants

Mécanisme :



## 7. BHP/BFUP et BAP

BAP



## 7. BHP/BFUP et BAP

Les développements récents dans la technologie des bétons dépendent de l'utilisation des adjuvants et des additions minérales

Bétons autoplacants /  
autocompactants  
**BAP**

Bétons à haute  
résistance  
**BHR** et béton fibrés à ultra  
haute performance **BFUP**

## 7. BHP/BFUP et BAP

### BAP

- Auto-nivelant
- Pas de ressuage
- Facile à mettre en place (enrobage des armatures)
- Pas de mise en place par vibration (gain de temps et de main d'oeuvre)



## 7. BHP/BFUP et BAP

BAP

→ Cadence de construction augmentée

**250 m high building**  
**Roppongi Hills, Tokyo**



## 7. BHP/BFUP et BAP

### BAP

Technologie des matériaux :

- Augmentation du contenu en ciment et en additions minérales  
*(p. ex. fillers calcaires, cendres volantes)*
- Espacement des granulats
- Utilisation de super plastifiants
- Utilisation d'épaississants pour éviter la ségrégation du mélange

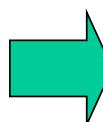
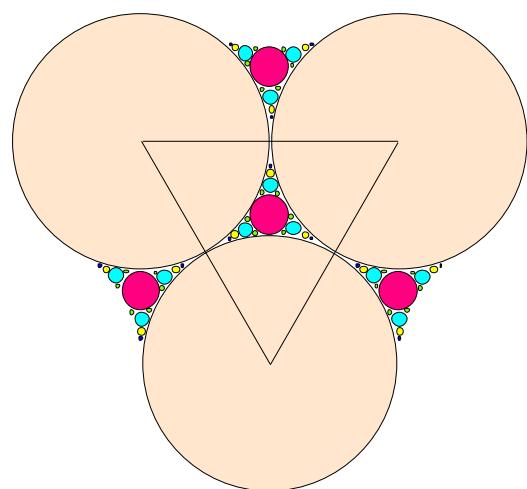
## 7. BHP/BFUP et BAP

### BAP

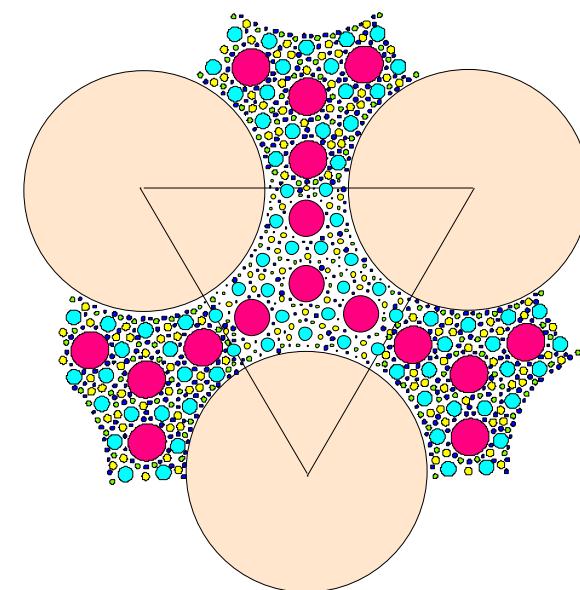
Augmenter la quantité de pâte avec **Utilisation de fillers calcaire, cendres volantes, ...**

→ augmentation du film lubrifiant (réduction des frottements entre les granulats)

béton classique :



béton autoplaçant :

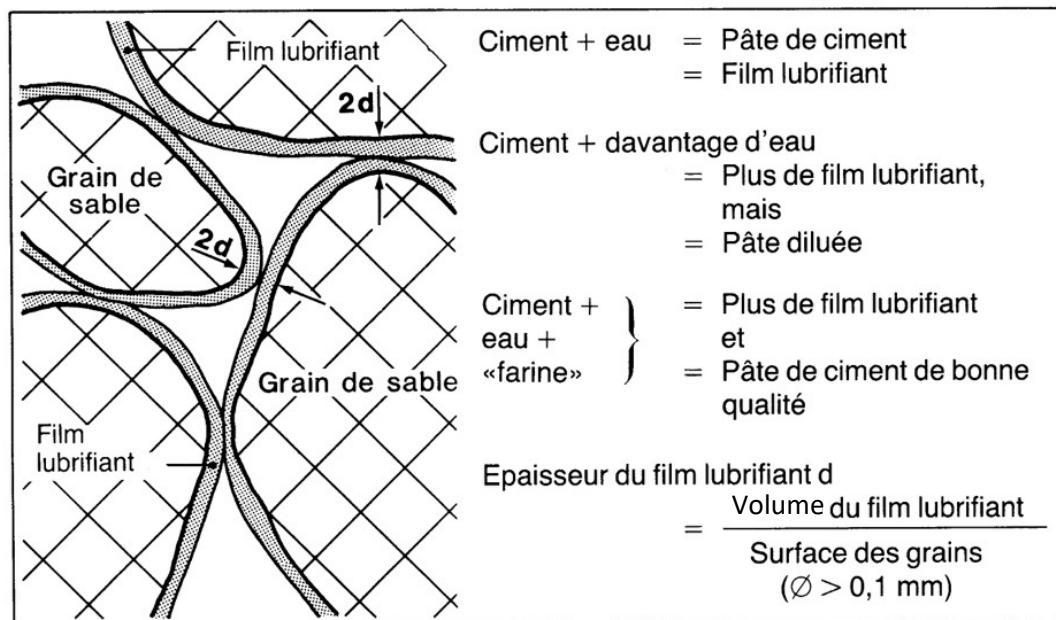


## 7. BHP/BFUP et BAP

### BAP

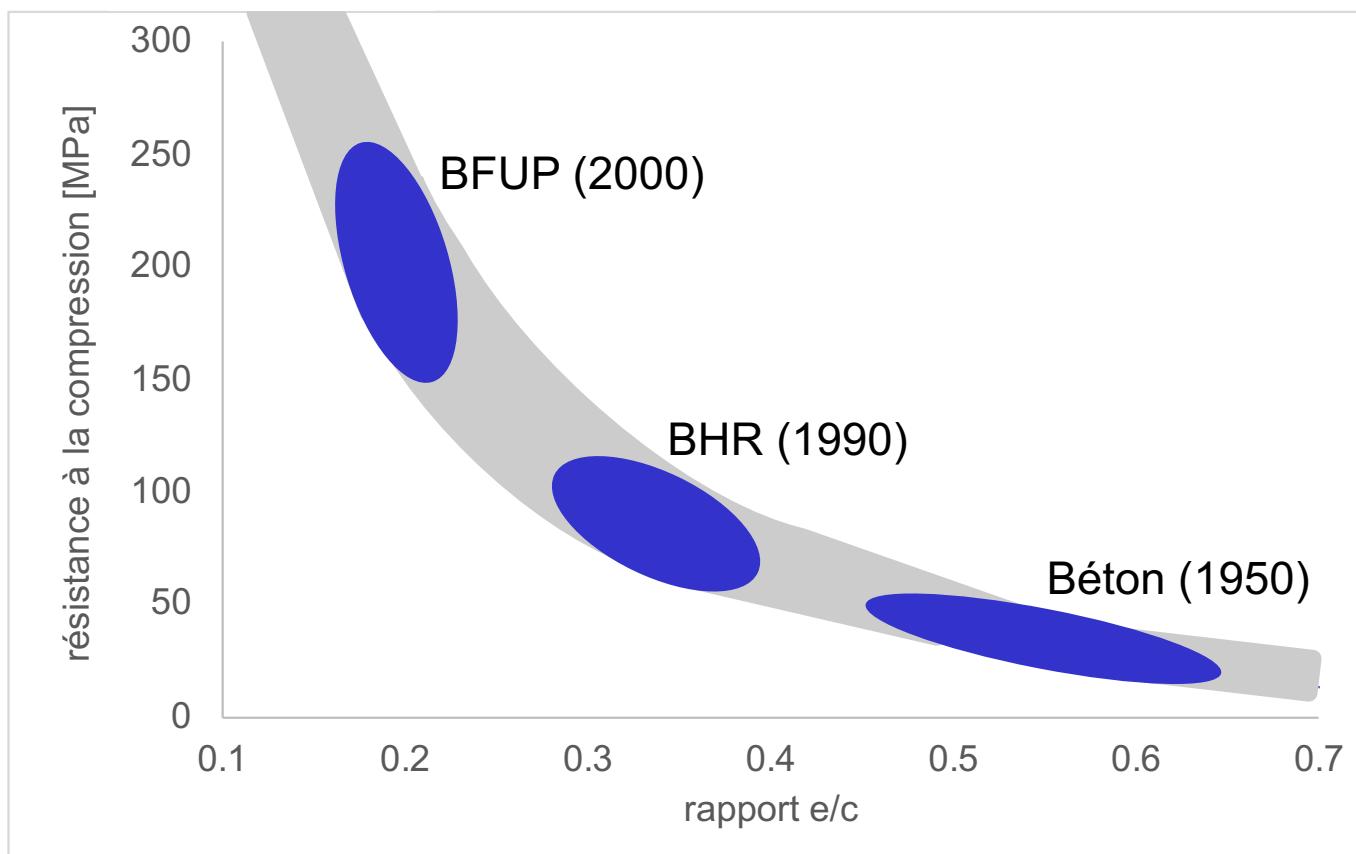
Augmenter la quantité de pâte avec **Utilisation de fillers calcaire, cendres volantes, ...**

→ augmentation du film lubrifiant (réduction des frottements entre les granulats)



## 7. BHP/BFUP et BAP

BHR / BFUP



## 7. BHP/BFUP et BAP

### BHR / BFUP

Utilisation et avantages :

**Gratte-ciel :**

- Colonnes plus mince pour les étages bas – jusqu'à 30% d'espace en plus.
- Construction plus rapide (haute résistance au jeune âge)
- Réduction des coûts → moins d'acier, construction plus rapide.

**Mais aussi :**

- Résistance (à court et long terme)
- Durabilité
- Etanchéité

## 7. BHP/BFUP et BAP

BHR / BFUP

### Les gratte-ciels

1966-67, Lake Point Tower, Chicago

**52 MPa**, 70 étages, un tous les 3 jours.

1976, Water Tower, Chicago

**62 MPa**, 76 étages,  
à l'époque le plus haut bâtiment en béton  
renforcé

Two Union Square, Seattle

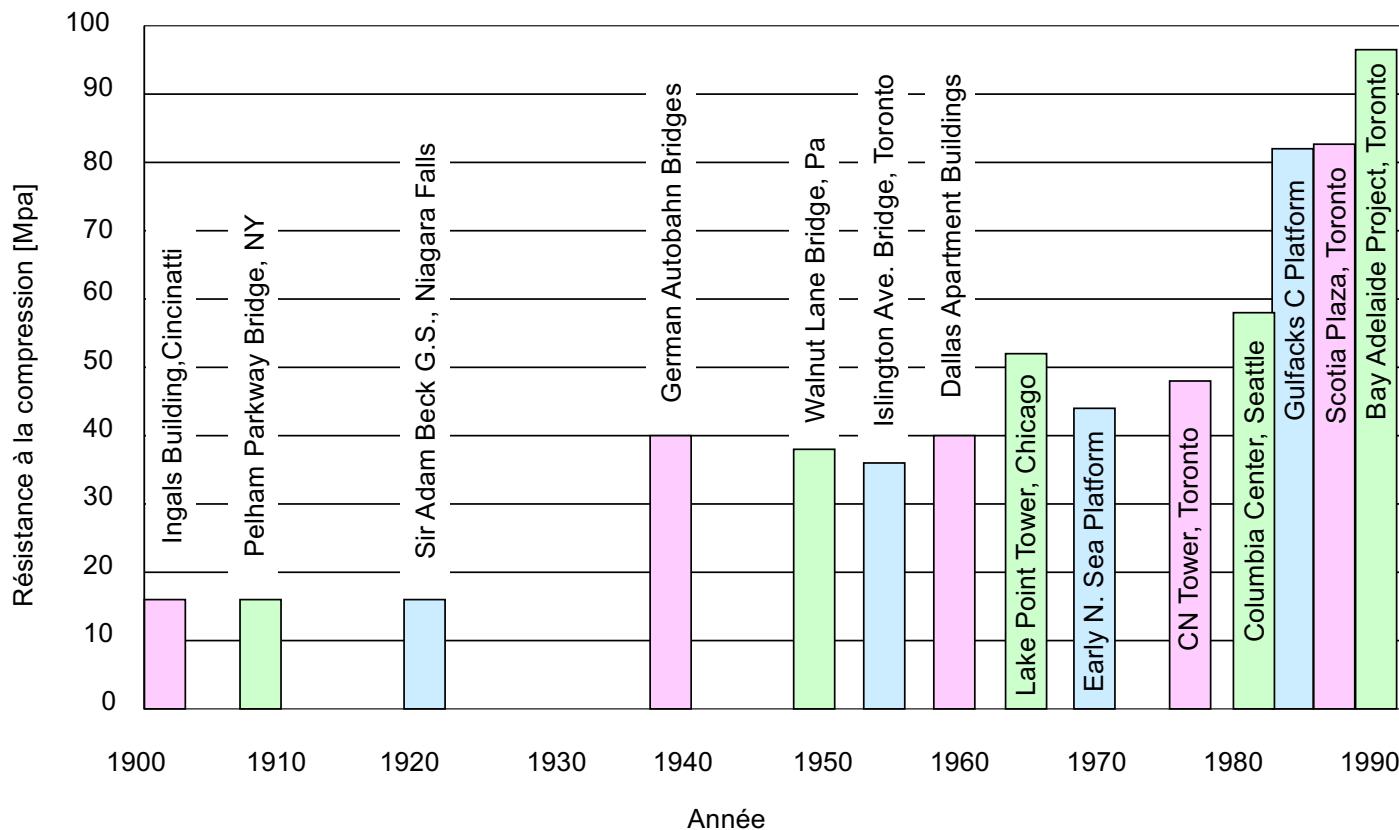
**131 MPa** la plus haute résistance pour des  
applications commerciales



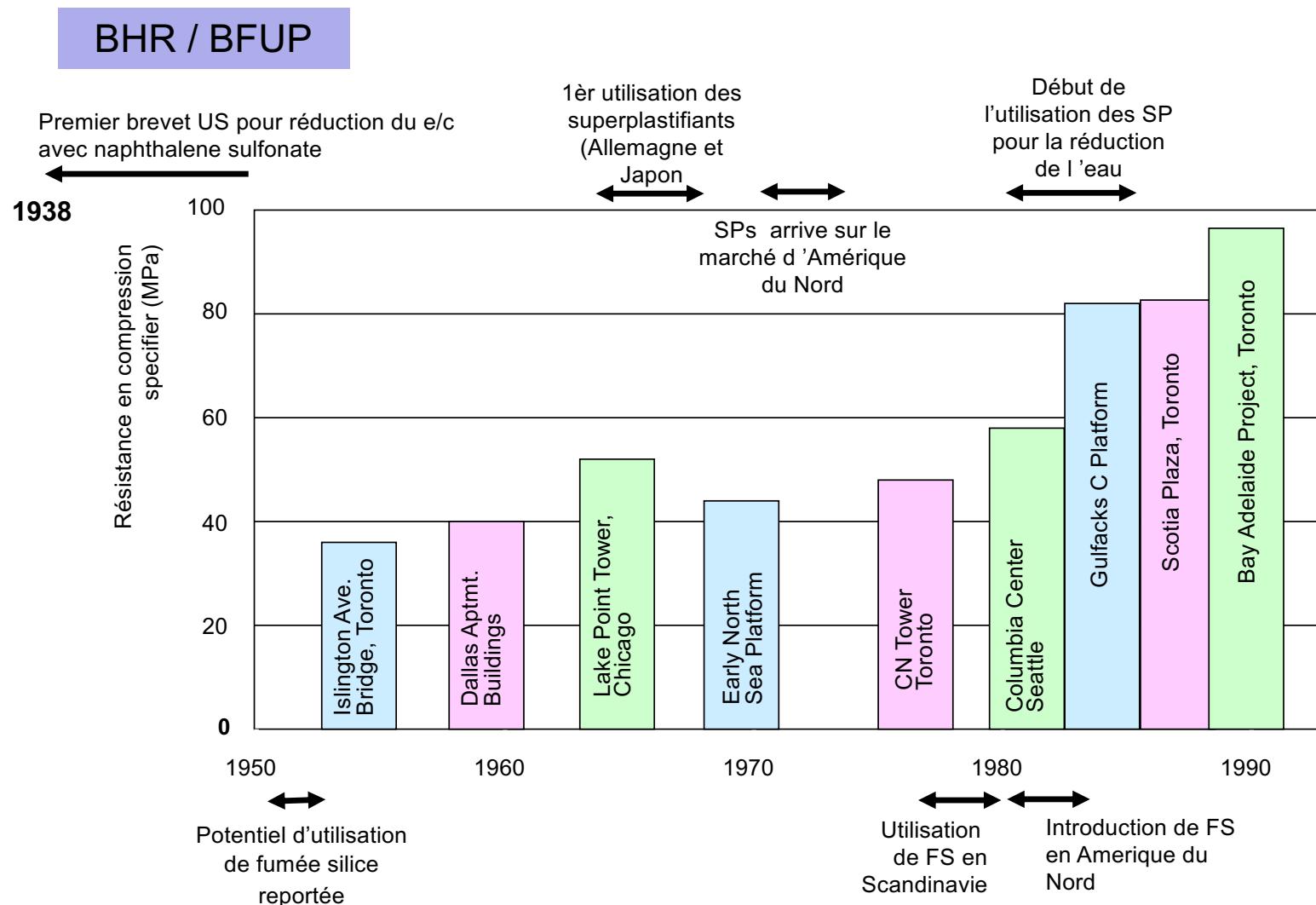
## 7. BHP/BFUP et BAP

### BHR / BFUP

Evolution de BHR

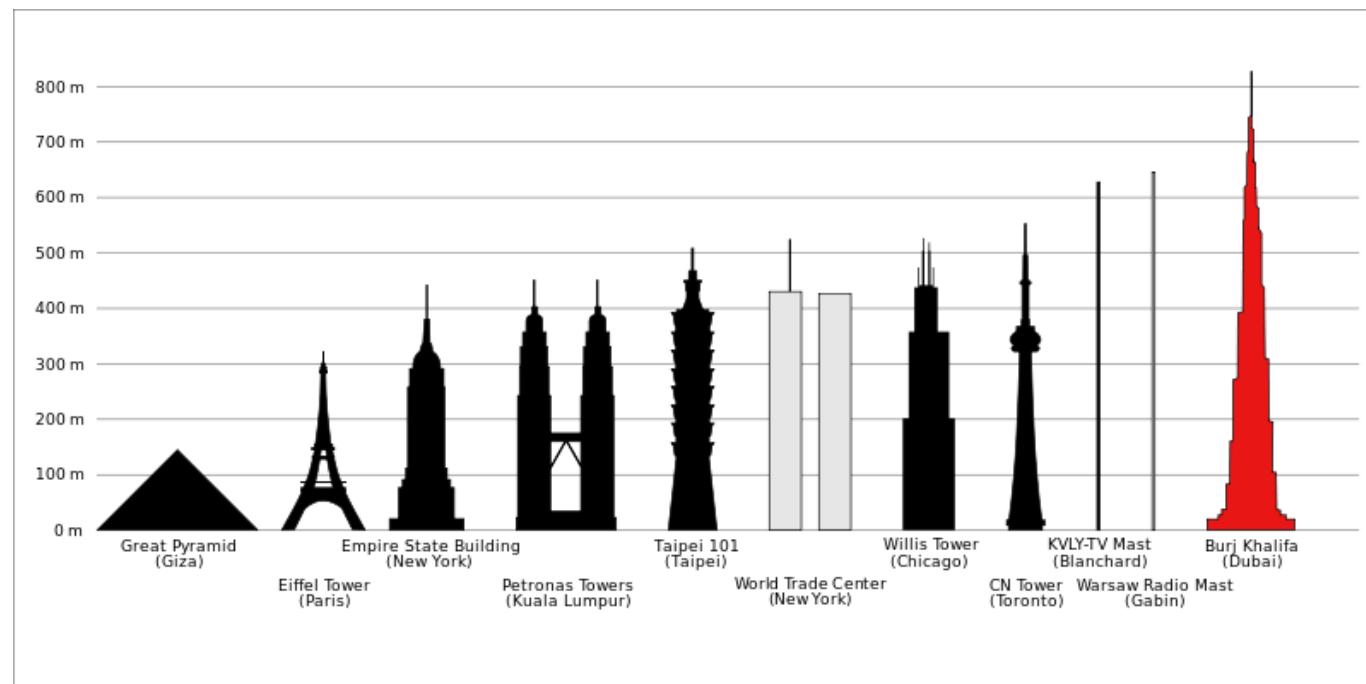


## 7. BHP/BFUP et BAP



## 7. BHP/BFUP et BAP

BHR / BFUP



## 7. BHP/BFUP et BAP

### BHR / BFUP

Technologie des matériaux :

- **Augmenter la compacité de la pâte :**
  - Baisse du rapport e/c, augmentation de la teneur en fines
- **Augmenter la compacité du béton :**
  - Optimiser la granularité des granulats
- **Augmenter la résistance mécanique des granulat :**
  - Granulats haute résistance
- **Amélioration de l'ITZ** (zone de transition interfaciale)
  - Choix du granulat (surface rugueuse), utilisation de fumée de silice

## 7. BHP/BFUP et BAP

BHR / BFUP

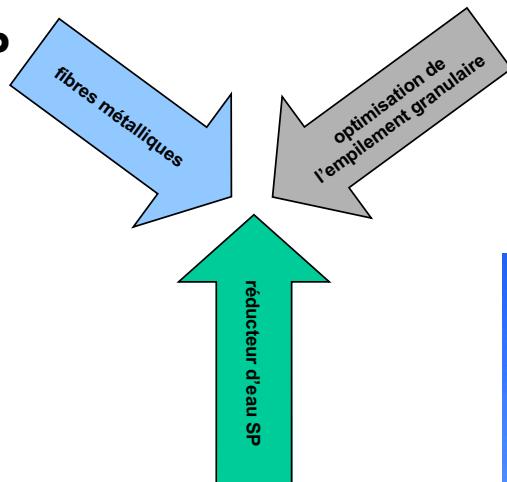
### Limitations

- Matériaux fragiles → rupture catastrophique
- Résistance au feu
- Formulation pointue
  - Qualifications nécessaires pour la mise en œuvre et la mise en place
  - Sensibilité aux fluctuations de la température
  - Interactions du ciment avec les adjuvants
- Sensible au retrait et à la fissuration endogène (autodessication)

## 7. BHP/BFUP et BAP

BHR / BFUP

**BFUP :**  
Béton fibré à ultra  
haute performance



Musée des Civilisations de l'Europe et de la Méditerranée à Marseille,  
façade et passerelle en BFUP. © Rudy Ricciotti

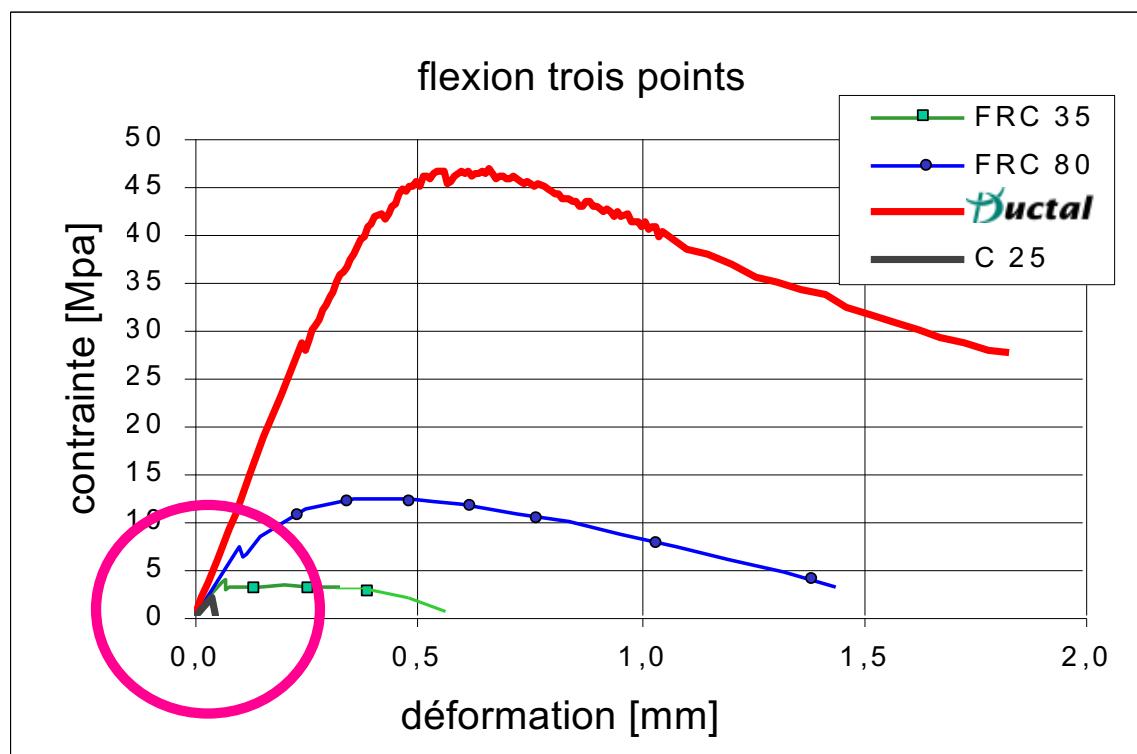


© Alain Herzog /EPFL  
61

## 7. BHP/BFUP et BAP

### BHR / BFUP

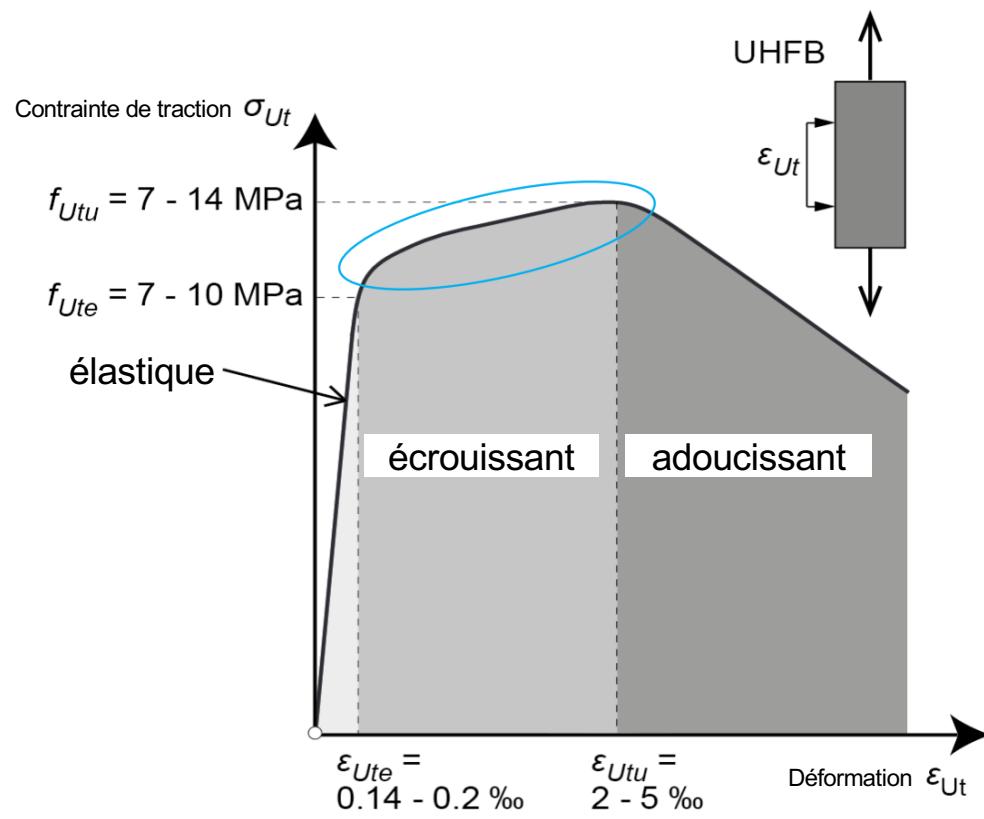
Résistance à la flexion :



## 7. BHP/BFUP et BAP

### BHR / BFUP

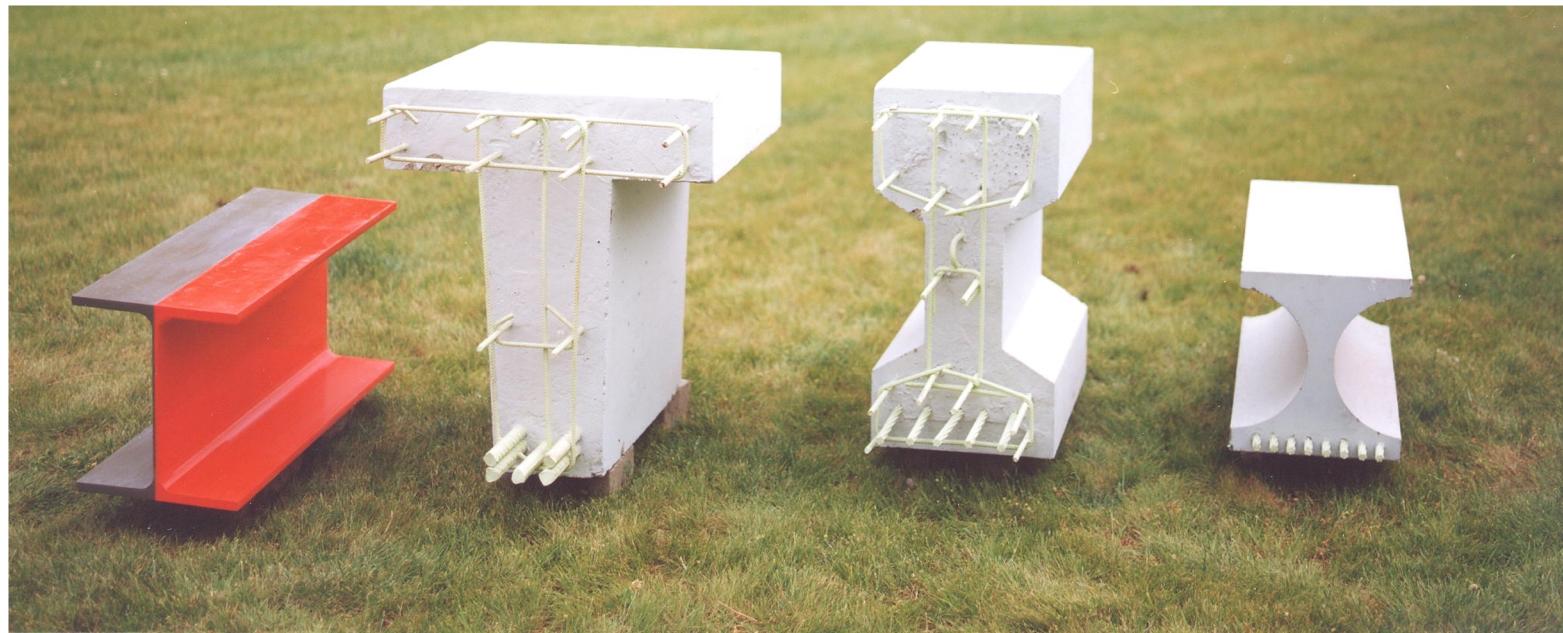
Résistance à la flexion (4 points) :



## 7. BHP/BFUP et BAP

BHR / BFUP

Poutres avec capacité porteuse équivalente



Poids [kg/ml]

ACIER  
**117**

BÉTON ARMÉ  
**530**

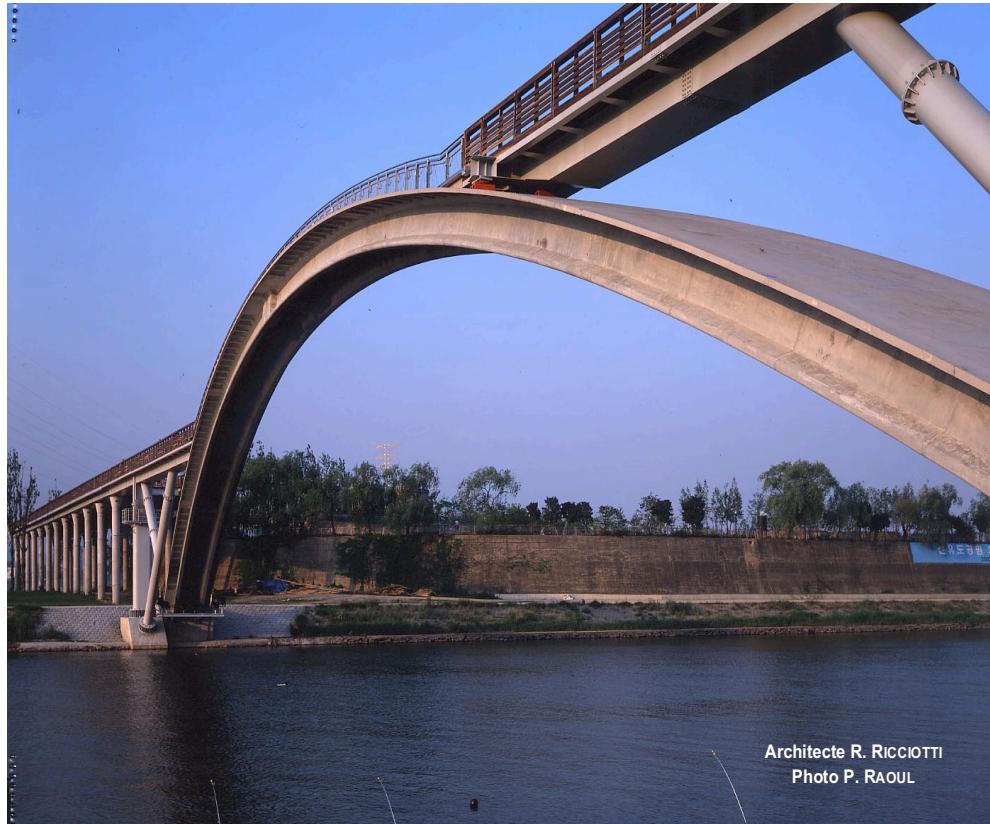
BÉTON  
PRÉCONTRAINTE  
**467**

BFUP  
**140**

## 7. BHP/BFUP et BAP

BHR / BFUP

Passerelle piétonne Seonyu, Séoul, Corée



Portée de l'arche : 120 m  
Epaisseur de la dalle : 30 mm

## 7. BHP/BFUP et BAP

BHR / BFUP

Viaduc de Chillon – A9, remise en état du tablier : utilisation de BFUP



## 7. BHP/BFUP et BAP

BHR / BFUP

Viaduc de Chillon – A9, remise en état du tablier : utilisation de BFUP



## 7. BHP/BFUP et BAP

BHR / BFUP



## Impression 3D du béton

- Possible grâce à un combinaison d'adjuvants
  - Pas de slump
  - Viscosité contrôlée
  - Vitesse de prise
- Produits et applications de niche pour le moment

| Avantages                | Inconvénients                       |
|--------------------------|-------------------------------------|
| Main d'oeuvre réduite    | Main d'oeuvre très spécialisée      |
| Peu de pertes de matière | Prix élevé (appareils, adjuvants)   |
| Géométries optimisées    | Difficulté à intégrer les armatures |
|                          | Mortier plutôt que béton            |

## **8. L'essentiel**

- Quels sont les principaux types d'adjuvants?
- Quels sont leurs fonctions, expliquer les mécanismes
- Comment la technologie des matériaux permet-elle de réaliser des bétons BAP?
- Comment la technologie des matériaux permet-elle de réaliser des bétons BHR et BFUP?
- Quels sont les principaux avantages des BAP?
- Quels sont les principaux avantages des BHR et BFUP?